

DINAMIKUS TEHERREL TERHELT ACÉL GERENDA MEGERŐSÍTÉSE UTÓFESZÍTÉS ALKALMAZÁSÁVAL

Radnay László

Tanársegéd

Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Építőmérnöki Tanszék, 4028 Debrecen, Ótemető u. 2-4.
radnaylaszlo@gmail.com

Iványi Miklós

Professzor Emeritus

Pécsi Egyetem, Pollack Mihály Műszaki Kar, Szilárdságtan és Tartószerkezetek Tanszék
7624 Pécs, Boszorkány u. 2.
drivanyi@pmmk.pte.hu

Összefoglalás

Acélszerkezetek utófeszítésének hatásait vizsgálva megállapítható, hogy a nyomóerő bevezetése a lehajlás mérséklése és az igénybevételek átrendezése mellett csökkenti a szerkezet sajátkörüffrekvenciáját. Harmonikus gerjesztő erővel terhelt gerendák esetében ez kisebb rezonanciatényezőt eredményez, abban az esetben, ha a gerjesztő erő körffrekvenciája nagyobb, mint a szerkezet sajátkörüffrekvenciája. A rezonanciatényező csökkenésével csökken a szerkezet maximális elmozdulása, -sebessége és -gyorsulása, valamint a keletkező dinamikus teher. A rezgés sebességének korlátozására egészségügyi-, és technológiai okok miatt lehet szükség. A dinamikus erő csökkenése pedig a szerkezeti elem igénybevételeit csökkenti. Jelen cikkben egyszerűsített rendszeren vizsgáljuk meg a jelenséget.

Kulcsszavak: feszített acélszerkezet, rezonanciatényező, dinamikus teher

Abstract

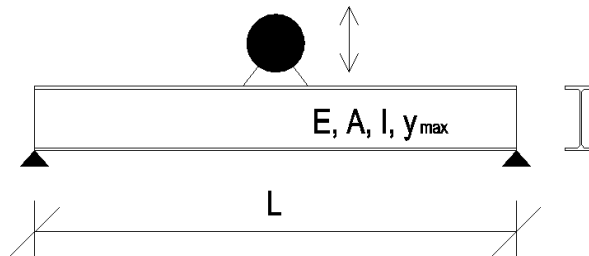
Post-tensioning has significant influence on both static and dynamic behaviour of the steel beams. Structural performance can be positively affected by the compressing force acting on the cross-section resulting stress redistribution, reduction in deflection and also lower natural frequency. The reduced natural frequency of the beam loaded by harmonic excitation force yield to lower resonance factor when the angular frequency of the excitation force is higher than the natural frequency of the beam. Lower dynamic loads can be determined due to lower resonance factor which resulting also lower maximum displacement, velocity and acceleration of structure. Because of the health protection or other technological reasons limitation of the vibration effect may be required. By reducing dynamic loads, the stresses of the structural elements can also be reduced.

Keywords: post tensioned steel structure, resonance factor, dynamic load

1. Dinamikus teherrel terhelt acél gerenda

1.1 Gerenda vizsgálata

Vizsgáljuk meg egy meglévő acélgerendás födémét, amelyre funkcióváltás miatt egy gépet szeretnének helyezni. Az egyszerűség kedvéért az 1. ábrán látható elrendezést vizsgáljuk. A szerkezetből kiragadunk egy kéttámaszú csuklós "I" szelvényű gerendát. A gerenda rugalmassági modulusa, keresztmetszete, és a támaszköz ismert.



1. ábra. Vizsgálati elrendezés

A feszítáv felénél helyezkedik el a dinamikus terhelést létrehozó forgó részekkel rendelkező gép. Feltételezzük, hogy a rendszer csak függőleges irányban képes elmozdulni és, hogy a gerjesztő hatást kifejtő gép egy ponton terhel a gerendára. Ismert a gép önsúlya és ismerjük a létrehozott gerjesztő erőt, amit a (1) képlet ír le.

$$q(t) = q \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (1)$$

ahol:

- q a külpontos szerkezeti elem forgásából keletkező erő maximális értéke;
- ω a forgás szögsebessége;
- t az idő.

Ahhoz, hogy egyszabadságfokú rezgésként vizsgálhassuk a feladatot, meg kell határozni a gerenda redukált tömegét, egy helyettesítő tömeget, aminek a kinetikai energiája megegyezik egyszabadságfokú rendszerrel az eredeti modell kinetikai energiájával, valamint a rugóállandót, amit a közepén terhelt kéttámaszú tartó lehajlásából származtathatunk, amelyet a (2) összefüggéssel határozhatunk meg:

$$k = \frac{48 \cdot E \cdot I_y}{L^3}, \quad (2)$$

ahol:

- E a rugalmassági modulus;
I_y a gerenda inercianyomatéka a vízszintes tengelyre;
L a gerenda hossza.

A fentiek ismeretében meg lehet határozni a szerkezet sajátkörfrekvenciáját

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m_1 + m_2}}, \quad (3)$$

ahol:

- m₁ a tartó redukált tömege;
m₂ a gerjesztő gép tömege.

A sajátkörfrekvencia és a gerjesztés frekvenciájának ismeretében számítható a rezonanciatényező. (4) A rezonanciatényező segítségével meghatározzuk a maximális elmozdulást (5), a maximális rezgéssebességet (6), majd a maximális gyorsulást (7).

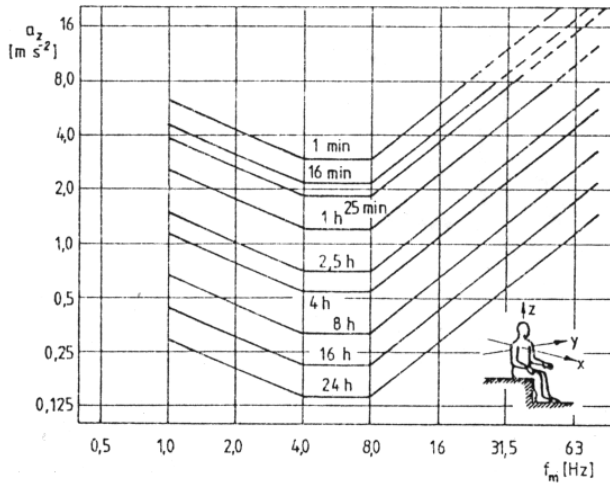
$$\mu = \frac{1}{\left| 1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \right|}, \quad (4)$$

$$x_{\max} = \mu \cdot \frac{q}{k}, \quad (5)$$

$$v_{\max} = \omega \cdot x_{\max}, \quad (6)$$

$$a_{\max} = \omega \cdot v_{\max}, \quad (7)$$

Amennyiben a kapott maximális rezgéssebesség/gyorsulás meghaladja az egészségügyi vagy technológiai okból előírt maximális sebességet/gyorsulást, akkor azt csökkenteni kell. A 2. ábrán az emberi szervezetre a test függőleges tengelyével egybeeső maximális gyorsulások láthatók az ISO2631 szerint.



2. ábra. Függőleges gyorsulási határértékek

2. A rezgésebesség csökkentésének lehetőségei

A továbbiakban korlátozzuk vizsgálatainkat a rezgésebesség csökkentésére. (6) és (7) alapján látható, hogy a rezgésebesség csökkenése a gyorsulás és az elmozdulás csökkenésével jár együtt.

2.1. A szerkezeti csillapítás figyelembevétele

Az eddigiekben a mindig jelenlévő szerkezeti csillapítást figyelmen kívül hagytuk. Ez az elhanyagolás a ténylegestől nagyobb értékű rezonanciatényezőt eredményezett, így a biztonság javára közelítő eredményt adott a maximális elmozdulás-, sebesség- és gyorsulás értékekre.

2.2. A tartószerkezet merevségének módosítása

A maximális rezgésebességet közvetlenül kifejezve a következő két esetet kapjuk:

$$\omega < \omega_0 \text{ esetén:} \quad \omega > \omega_0 \text{ esetén:}$$

$$v_{\max} = \frac{\omega \cdot q}{k - \omega^2 \cdot m}, \quad v_{\max} = \frac{\omega \cdot q}{\omega^2 \cdot m - k}, \quad (8)$$

A tartószerkezet merevségének növelése csak abban az esetben csökkenti a rezgésebességet, ha a gerjesztő erő körfrekvenciája kisebb a saját-körfrekvenciájánál.

2.3. Kiegészítő szerkezeti elemek alkalmazása

Kiegészítő tömegek, alátámasztó rugók és rezgéscsillapító berendezések beépítésével hatékonyan befolyásolható a rezgés. A rezgéssebesség mérséklésének szokásos módszere ez, hátránya, hogy drága és nő a szerkezet statikus terhe.

3. A rezgéssebesség csökkentése utófeszítés alkalmazásával

3.1. A feszítőerő hatása a dinamikai viselkedésre

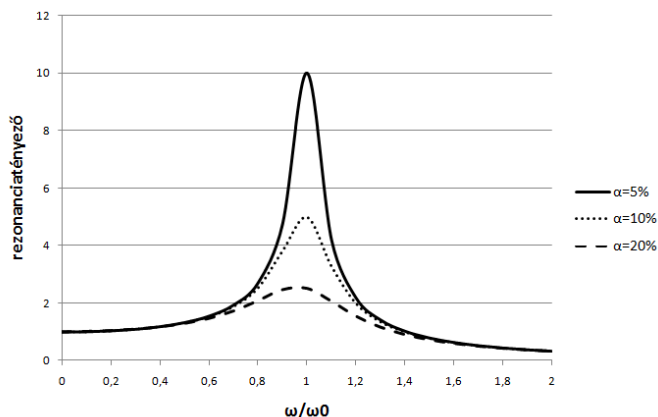
A nyomóerővel terhelt rúd sajátkörüffrekvenciáját a nyomóerő hatására keletkező másodlagos nyomatékok hatása miatt az eredeti rúdelem sajátkörüffrekvenciájának redukálásával kaphatjuk meg. A csökkentett érték (9) alapján számítható.

$$\omega_{0\text{mod}} = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{N}{S_{kr}}}, \quad (9)$$

ahol:

- | | | |
|----------|---|------------------------------------|
| N | – | a feszítőerőből származó nyomóerő; |
| S_{kr} | – | a rúd kritikus ereje. |

A 3. ábrán a rezonanciatényező értékei lettek feltüntetve a sajátkörüffrekvencia és a gerjesztő frekvencia függvényében, három különböző szerkezeti csillapítás esetére.



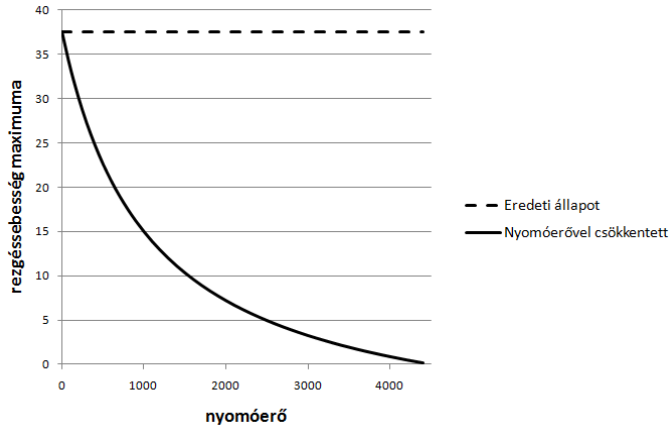
3. ábra. Rezonanciatényező a frekvenciaarány függvényében

Látható, hogy a sajátkörfrekvencia csökkenése abban az esetben csökkenti a rezonanciatényezőt, ha a gerjesztő frekvencia nagyobb a szerkezet sajátkörfrekvenciájánál. Jelentős csökkenést a rezonancia közelében érünk el.

Vizsgáljunk meg egy 3 m fesztávú IPE200 szelvényű gerendát. A gerenda és a burkolat redukált tömegét 1.2 t –nak választva vizsgáljuk meg a rezgésebbeséget a (10) függvénnyel leírható gerjesztő erőt kifejtő 0.2 t tömegű gép hatására!

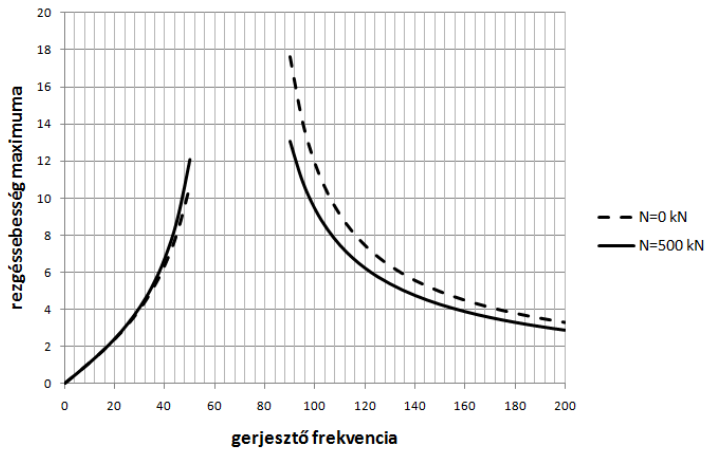
$$q(t) = 0,8kN \cdot \sin\left(80 \frac{rad}{s} \cdot t\right), \quad (10)$$

A rezgésebbesség maximális értéke 37 mm/s –ra adódott. A 4. ábrán a tartó terhelő tengelyirányú nyomóerő csökkentő hatása látható. A görbe 0 kN nyomóerőnél 37 mm/s rezgésebbesség maximumtól indul és 4475 kN nyomóerőnél éri el a 0 mm/s rezgésebbeséget. Ez a nyomóerő a rúd kritikus ereje. Ennél az erőnél stabilitásvesztés következik be, vagyis a tartó nem tér vissza eredeti helyzetébe, azaz nem rezeg. Gyakorlati szempontból természetesen csak a görbe első (legmeredekebb) szakasza az érdekes. 4 db. $\Phi 15,7$ átmérőjű pázsma megfeszítésével 1000 kN körüli nyomófeszültséget tudunk létrehozni, de ebben az esetben már biztosan gondoskodni kell a tartószerkezet oldalirányú kihajlásának megakadályozásáról is.



4. ábra. Rezgésebbesség maximuma a terhelő nyomóerő függvényében

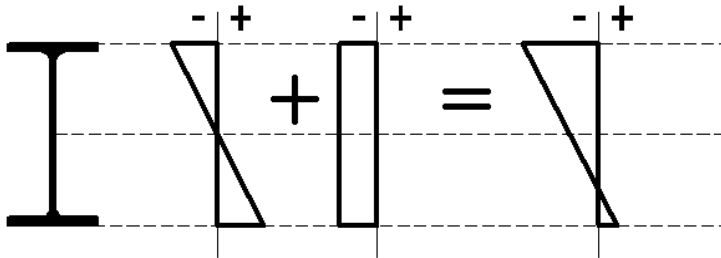
Az 5. ábrán gerjesztő frekvencia hatását láthatjuk a rezgésebbesség maximális értékére nyomóerő nélkül és 500 kN nyomóerő hatására. A gerenda sajátkörfrekvenciája 72 rad/s. Ennek környékén nincsenek ábrázolva a rezgésebbesség értékei, mert a szerkezeti csillapítást figyelmen kívül hagyva azok végtelenhez tartanak. A grafikon eredményei megerősítik a rezonanciatényező vizsgálatánál feltételezetteket.



5. ábra. Rezgéssebesség maximuma a gerjesztő frekvencia függvényében

3.2. A feszített acélszerkezet feszültségeloszlása

A feszítés előtt hajlított gerenda, utána nyomott-hajlított gerenda feszültségeloszlását kell vizsgálnunk. A nyomott-hajlított gerenda feszültségeloszlását a hajlításból kapott feszültségeloszlás és a nyomásból eredő feszültségek összegzésével kapjuk, ahogyan ez a 6. ábrán látható. Jelenlegi modellünket vizsgálva a gerenda középső keresztmetszete lesz a mértékadó.



6. ábra. Központosan feszített hajlított gerenda feszültségeloszlása

Az ábrán látható, hogy a bevezetett nyomóerő hatására a gerenda alján csökkent a feszültség a feszítés előtti állapothoz képest, míg az eredetileg is nyomott részen tovább nőtt a feszültség. Kedvezőbb eredményt kapunk, ha külpontos feszítést alkalmazunk.

A feszítőerő külpontos alkalmazása mellett további, részletesebb vizsgálat szükséges a következő változások miatt:

- A (9) képlet statikus jellegű központos nyomásra vonatkozik. A feszítőerő külpontos bevezetése esetén a normálfeszültség a rezgés folyamán nem lesz állandó nagyságú sem időben, sem pedig a gerenda magassága mentén.

- A külpontos feszítés mellett a vizsgált dinamikus teher hatására a pászma rögzítési pontjainak távolsága nem lesz állandó, ami miatt a pászma feszültsége ingadozni fog. Ez egy nagy frekvenciájú, kis feszültség-ingadozás. A maximális feszültséget úgy kell megválasztani, hogy azt a pászma kvázi végtelen fárasztási cikluson keresztül viselni tudja.

- Minél nagyobb külpontosságot alkalmazunk a feszítés során, annál jobban növeljük a szerkezet rugóállandóját, ami a sajátkörfrekvenciától nagyobb gerjesztő frekvencia esetén kedvezőtlen hatással van a rezonanciátényező értékére.

4. Összefoglalás

Statikus terhekkel terhelt acélszerkezetek utófeszítésének hatásait vizsgálva megállapítható, hogy külpontos nyomóerő bevezetése kedvezően alakítja át a keresztmetszet feszültségeloszlását, ezáltal növeli a teherbírást. Csökkenti a nyomatéki értékeket a tartó mentén, ezzel összefüggésben csökken a tartószerkezeti elem maximális lehajlása. Általánosan elmondható, hogy a szerkezet megerősítését gazdaságosan, kevés helyszíni munkával, az önsúly jelentős növelése nélkül lehet megoldani.

Dinamikus teher esetén további előnyeit tapasztalhatjuk az utófeszítésnek más megerősítési módokhoz képest abban az esetben, ha harmonikus gerjesztő erővel terhelt gerendák esetében a gerjesztő erő körfrekvenciája nagyobb a sajátkörfrekvenciánál:

- A bevezetett statikus normálerő csökkenti a szerkezet sajátkörfrekvenciáját. Ez a szerkezet maximális elmozdulását, -sebességét és -gyorsulását, valamint a keletkező dinamikus terhet is csökkenti.
- A merevség kis növekedése mellett csökkenthető a szerkezeti elem lehajlása és teherbírása, ami a (8) alapján szintén kedvező a rezgéssebességek szempontjából.

5. Irodalomjegyzék

- [1] CTRE Bridge Engineering Center Iowa State University *Evaluation of post-tension strengthened steel girder bridge using FRP bars*
- [2] Daly F.A. , Witarnawan I.W. *A method for increasing the capacity of short and medium span bridges*
- [3] Györgyi, J. *Dinamika*, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2002.
- [4] Györgyi, J. *Szerkezetek dinamikája*, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2006.
- [5] MSZ EN 1993-1-1 Eurocode 3: *Acélszerkezetek tervezése*, 2009.